



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

①2 **Offenlegungsschrift**  
①0 **DE 199 07 722 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 01 S 3/098**  
H 01 S 3/081  
H 01 S 3/108  
H 01 S 3/115  
H 01 S 3/16  
B 29 C 59/16  
B 23 K 26/00

②1 Aktenzeichen: 199 07 722.3  
②2 Anmeldetag: 23. 2. 99  
④3 Offenlegungstag: 26. 8. 99

DE 199 07 722 A 1

③0 Unionspriorität:  
339/98 25. 02. 98 AT

⑦1 Anmelder:  
Dentek-Lasersystems Produktions Ges.m.b.H.,  
Graz, AT

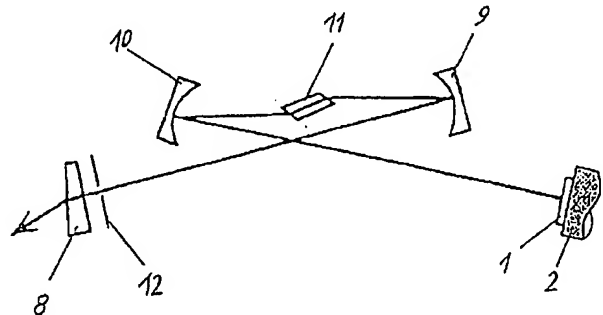
⑦4 Vertreter:  
Rehberg und Kollegen, 37085 Göttingen

⑦2 Erfinder:  
Winter, Ernst, Dr., Wien, AT; Sorokin, Evgeni, Dr.,  
Wien, AT; Sorokina, Irina, Dr., Wien, AT

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Lasersystem zur Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse

⑤1 Ein Lasersystem zur Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse, mit einem Laserresonator, der zumindest ein aktives Festkörper-Oszillatorelement enthält, vorzugsweise eine dünne Scheibe eines laseraktiven Kristalls mit hoher Verstärkungsbandbreite, insbesondere eines "Quasi-drei-Niveau"-Systems wie Yb : YAG, weist zumindest je eine Einrichtung zur Phasenverkopplung der Lasermode und zur Dispersionskompensation auf. Um für industrielle Anwendungen ultrakurze Pulse mit sehr hohen Durchschnittsleistungen leistungsskalierbar abgeben zu können und dabei möglichst einfach und nicht aufwendig aufgebaut zu sein, ist die Einrichtung zur Phasenverkopplung (1, 11, 13) als passives, nichtlineares Element ausgeführt und ist eine prismenlose Einrichtung zur Dispersionskompensation (15-17) vorgesehen.



DE 199 07 722 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Lasersystem zur Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse, mit einem Laserresonator, der zumindest ein aktives Festkörper-Oszillatorelement enthält, vorzugsweise eine dünne Scheibe eines laseraktiven Kristalls mit hoher Verstärkungsbandbreite, insbesondere eines "Quasi-drei-Niveau"-Systems wie Yb:YAG, und je einer Einrichtung zur Phasenverkopplung der Lasermoden und zur Dispersionskompensation.

In den letzten Jahren wurde in der Technologie der ultrakurzen Pulse ein dramatischer Durchbruch erzielt. Die typischen Femtosekundenpuls-Quellen der vorhergehenden Dekade, (Gas)Ionen-Laserpumpquellen und (flüssig) Farbstoffoszillatoren und Verstärker, haben Festkörpersystemen Platz gemacht, bei welchen insbesondere die durch diodengepumpte frequenzverdoppelte Nd-Laser gepumpten Ti:Saphir Oszillatoren und die durch lampengepumpte frequenzverdoppelte Nd-Laser gepumpten Ti:Saphir Verstärker zu erwähnen sind. Eine weitere Art von Femtosekunden-Lasern basiert auf Cr-dotierten Fluoridkristallen (LiSGaF, LiSAF), die bei 670 nm direkt diodengepumpt werden können und bezüglich der Pulsdauer bereits nahe an die Leistung von Ti:Saphir herankommen. Auch andere Ausgangsparameter wie Pulsenergie und Durchschnittsleistung sind beträchtlich verbessert worden. Tatsächliche wirtschaftliche Anwendungen sind aber aufgrund der hohen Komplexität der Anlagen für hohe Leistungen – vielstufige Architektur der Systeme – und des hohen apparativen und steuerungstechnischen Aufwandes und damit verbundener hoher Kosten noch nicht absehbar. Für den für nicht-wissenschaftliche Anwendungen eher uninteressanten Pulsdauerbereich unter 100 fs ist ein hoher Aufwand bei komplexen Lösungen noch vertretbar, während aber für den wirtschaftlich interessanten Pulsdauerbereich zwischen 100 und 500 fs noch keine geeigneten Alternativen für hohe Durchschnittsleistungen über 1 W vorliegen.

Ein aufgrund guter und erforschter thermooptischer Eigenschaften und geringer Stokes-Verschiebung ideales Lasermedium ist etwa ein Yb:YAG-Kristall, der hohe Durchschnittsleistungen ermöglicht und aufgrund geeigneter Absorptionseigenschaften bei verfügbaren Hochleistungsdiolenwellenlängen und langer Lebensdauer der angeregten Zustände direktes Diodenpumpen erlaubt.

Durch ein neues Konzept, das des in der US-PS 5,553,088 beschriebenen Scheibenlasers, ist es gelungen, für Hochleistungssysteme eine Leistungsskalierbarkeit im Bereich von ca. 10 W bis zu etwa 1 kW Durchschnittsleistung zu erreichen. Der verminderte thermische Linseneffekt und die potentiell kompakte Architektur gestatten zusammen mit einer Effektivität von über 50% einen kompakten, für industrielle Anwendungen geeigneten Aufbau.

Mit dieser Art von Festkörperlasern wurde die Erzeugung ultrakurzer Pulse mit hohen Energien bisher noch nicht realisiert, welche z. B. für die Materialbearbeitung mit neuartigen Eigenschaften, wie akustische und thermische Schockfreiheit, notwendig ist, wobei auch in der genannten Patentschrift keinerlei Lösungsansätze für diese Aufgabenstellung angedeutet sind.

Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Lasersystem anzugeben, das für industrielle Anwendungen ultrakurze Pulse mit sehr hohen Durchschnittsleistungen leistungsskalierbar abgeben kann und dabei möglichst einfach und nicht aufwendig aufgebaut ist.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Einrichtung zur Phasenverkopplung als passives, nichtlineares Element ausgeführt ist, und daß eine prisma-lose Einrichtung zur Dispersionskompensation vorgesehen

ist. Die passive Phasenverkopplung über nichtlineare optische Elemente erlaubt die einfachste Generation von ultrakurzen Impulsen. Ein weiterer Bereich an Durchschnittsleistungen wird speziell mit Yb:YAG in Form eines Scheibenlasers mit zumindest einem laseraktivem Element in Form einer vorzugsweise 200 bis 400 µm dicken Scheibe von einigen Millimetern Durchmesser erzielt, welches System zur Erzeugung von Pulsen im µJ- und mJ-Bereich (letzteres mit Verstärker) mit Pulsweiten von etwa 200 fs geeignet ist. Weiters können lange Strahlwegen teilweise in Glas, durch die prisma-lose Konstruktion der Einrichtung zur Dispersionskompensation vermieden werden, die Einstellungsstabilität bleibt besser erhalten und die Nachjustierung ist weniger kompliziert. Insgesamt sind also prisma-lose Einrichtungen kompakter, weniger wartungsintensiv und wirtschaftlicher.

Für Lasersysteme kleiner Leistung (einige 100 mW) und auf anderer Basis wurde – siehe etwa die EP-0 492 994 A2 – ein passives Modenverkopplungsverfahren mittels Kerr-Linsen-Einrichtung realisiert, wobei allerdings keinerlei Hinweise auf die Anwendung auf Hochleistungs-Lasersysteme mit ultrakurzen Pulsen zu finden sind. Vielmehr wurden weitere Fortschritte mit halbleiterbasierten sättigbaren Absorbern (SESAMs) erzielt, die sich aber für Hochleistungs-Lasersysteme als zu kurzlebig hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bei Leistungen über einigen 100 mW herausgestellt haben. Demgegenüber sind die nichtlinearen optischen Verfahren vorzuziehen, da sie mittels entsprechender Fokussierung des Strahls leistungsskalierbar sind und nicht auf direkter Absorption von Strahlung beruhen.

Gemäß einem weiteren Merkmal der Erfindung ist vorgesehen, daß die Einrichtung zur Phasenverkopplung als Kerr-Linsen-Phasenverkopplungs-Einrichtung, vorzugsweise mit weicher Blende, ausgeführt ist. Allenfalls können auch eine APM-Einrichtung oder eine nichtlineare Spiegelanordnung mit Nichtlinearität 2. Ordnung vorgesehen sein. Diese Varianten gestatten eine leistungsskalierbare Erzeugung ultrakurzer Laserpulse mit hohen Energien, ohne daß dadurch die Einrichtung zur Phasenverkopplung durch die hohen Energien beschädigt wird. So sind Leistungen im Resonator von weit über 10 W erzielbar, während bei den meist verwendeten Techniken unter Einsatz von halbleiterbasierten sättigbaren Absorbern der sichere Leistungsbereich nur zwischen 0,01 und ca. 1 W liegt.

Vorzugsweise ist zur Erzielung einer kompakten und für industrielle Anwendungen vereinfachten Bauweise vorgesehen, daß zumindest ein laseraktives Element gleichzeitig ein nichtlineares Element der Einrichtung zur Phasenverkopplung, vorzugsweise der Kerr-Linsen-Phasenverkopplungs-Einrichtung, ist. Mit dieser Bauweise, welche unter Verwendung der standardmäßigen X-förmigen Resonatorform ausgeführt wird, ist eine wesentliche Vereinfachung des Aufbaus zusammen mit seiner Verkleinerung möglich.

Um speziell bei sehr dünnen aktiven Lasermedien die allenfalls fehlende Selbstfokussierung auszugleichen und ausreichende Nichtlinearität für die Phasenverkopplung zu erzielen, ist gemäß einem weiteren Merkmal der Erfindung eine weitere Fokusszone des Laserlichts innerhalb des Laserresonators eingestellt und ist in dieser Fokusszone ein selbstfokussierendes, transparentes, optisches Material angeordnet.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist als prisma-lose Einrichtung zur Dispersionskompensation ein System von dielektrischen Dispersionskompensationsspiegeln, vorzugsweise Gires-Tournois-Interferometer Spiegeln, vorgesehen. Aufgrund der typischen Bandbreite von 20 bis 30 nm können diese Spiegel Pulse bis hinunter zu 40 fs verarbeiten, sie zeigen besonders geringe Verluste unter 0,1%

pro Reflektion und hohe Dispersion von 100 bis 150 fs<sup>2</sup> pro Reflektion. Auch die Leistungsverarbeitungseigenschaften der Gires-Tournois-Spiegel sind ausgezeichnet, so daß sie speziell für die Erhaltung bzw. Gewährleistung der Leistungsskalierbarkeit auch bei groben Werten bestens geeignet sind.

Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung ist vorgesehen, daß dem Ausgangskoppler des Laserresonators ein regenerativer Verstärker nachgeschaltet ist. Diese Art der Verstärkung ist speziell für laseraktive Medien mit geringem Verstärkungsfaktor geeignet und die selbst bei durchschnittlichen Ausgangsleistungen von bis zu 100 W nicht über 1 bis 2 µJ aufweisenden Einzelpulse des Oszillators können damit in relativ einfacher Weise bis in den mJ-Bereich bei Repetitionsraten von ca. 10 kHz verstärkt werden.

Vorteilhafterweise ist dabei vorgesehen, daß der regenerative Verstärker einen laseraktiven Festkörper, vorzugsweise eine dünne Scheibe eines laseraktiven Kristalls mit hoher Verstärkungsbandbreite, insbesondere eines "Quasidrei-Niveau"-Systems wie Yb:YAG, aufweist. Damit sind Vorteile wie beispielsweise gleiche Technologie, lange Lebensdauer und Leistungsskalierbarkeit sowohl für den primären Laseroszillator als auch den Verstärker gesichert.

Um bei hohen Verstärkungen eine Beschädigung oder Beeinträchtigung des Verstärkers selbst zu vermeiden, weist erfindungsgemäß der regenerative Verstärker eingangsseitig Einrichtungen zur dispersiven Streckung der Laserpulse und ausgangsseitig Einrichtungen zur Re-Komprimierung der Laserpulse auf. Damit ist gefahrlos eine Anhebung der Energie der Einzelpulse auf bis zu 10 mJ möglich, was einer optischen Spitzenleistung im 10 GW/cm<sup>2</sup>-Bereich entspricht.

Eine Erhöhung der Einzelpuls-Energien kann aber auch dadurch erreicht werden, daß der Laserresonator eine Cavity-Dumping-Schaltung oder eine Güteschaltung enthält. Damit sind Repetitionsraten im Bereich von 1 MHz und Pulsenergien von ca. 10 µJ beispielsweise durch Cavity-Dumping erzielbar.

In einfacher und bewährter Weise können die genannten Schaltungen als Bragg- oder Pockelszelle oder durch einen akusto-optischen Modulator realisiert sein.

In der nachfolgenden Beschreibung sollen die Erfindung, weitere Merkmale und Vorteile davon anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen näher erläutert werden.

Dabei zeigt die Fig. 1 einen bekannten Aufbau für ein Scheibenlaser-Pumpschema, Fig. 2 zeigt schematisch einen einfachen Aufbau eines erfindungsgemäßen Resonators, Fig. 3 ist eine schematische Darstellung eines modular erweiterten erfindungsgemäßen Resonators und Fig. 4 zeigt einen regenerativen Verstärker gemäß der Erfindung in schematischer Darstellung.

Das laseraktive Medium eines in Fig. 1 beispielhaft dargestellten Scheibenlasers ist eine dünne Scheibe 1 eines laseraktiven Kristalls, die auf einer Wärmesenke 2 angebracht ist. Dabei wird als laseraktiver Kristall vorzugsweise Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) verwendet, der mit vorzugsweise 8 bis 13% Ytterbium dotiert ist und ein "Quasidrei-Niveau"-System darstellt. Dieses Material bietet durch seine relativ grobe Fluoreszenzbandbreite optimale Voraussetzungen für die Erzeugung ultrakurzer Laserpulse im Femtosekundenbereich. Bei Verwendung als aktiver Endspiegel, wie in Fig. 1, ist diese Scheibe 1 auf der Vorderseite mit einer Antireflexionsbeschichtung und auf der Rückseite mit einer hochreflektierenden Beschichtung versehen. Die Wärmesenke besteht vorzugsweise aus Kupfer mit einer Indium-Folie als Wärmekontakt, mit der die Scheibe 1 mit ca.

7 mm Durchmesser und zwischen etwa 200 und 400 µm Dicke darauf montiert ist. Das Pump-Laserlicht wird über fasergekoppelte Hochleistungs-Diodenlaser erzeugt, wobei das Ende des Faserbündels 3 nahe der Scheibe 1 angeordnet ist und das Pump-Laserlicht auf einen ersten sphärischen Spiegel 4 abbildet. Durch vier doppelte Durchläufe des Pump-Laserlichts durch die Scheibe 1, realisiert durch Spiegel 4 bis 7, wird das Problem beseitigt, daß die Absorptionslänge wesentlich größer als die Scheibendicke ist. Mit 8 ist schließlich der Resonator-Endspiegel bezeichnet, der auch den Ausgangskoppler zum Austritt des Laserlichts aus dem Resonator darstellt.

Die Vorteile des Scheibenlasers bezüglich seiner Leistungsskalierbarkeit durch Veränderung des Durchmesser des Pumplichtstrahls oder durch die Verwendung von mehreren Scheiben in Serie sind bekannt, ebenso wie die Vorteile bezüglich des optischen Wirkungsgrades von ca. 50 bis 65% und der Strahlqualität.

Zur Erzeugung ultrakurzer Pulse des Laserlichts wird beispielsweise eine erste erfindungsgemäße Ausführungsform verwendet, die in Fig. 2 schematisch dargestellt ist und bei der der laseraktive Kristall 1 in Scheibenform als aktiver Endspiegel auf einer Wärmesenke 2 montiert ist. Der Laserresonator hat eine herkömmliche X-Form für den Strahlengang und das Pump-Laserlicht wird, wie oben bereits beschrieben, über einen der beiden konkaven Spiegel 9 oder 10 eingespeist. Da die geringe Dicke dieses Lasermediums keine ausreichende Selbstfokussierung bietet, ist vorteilhafterweise ein weiterer Brennpunkt innerhalb des Laserresonators vorgesehen, typischerweise zwischen den beiden Spiegeln 9 und 10, wobei ein transparentes optisches Material geeigneter Nichtlinearität 11 rein zum Zweck der Selbstfokussierung in diesem Brennpunkt angeordnet ist. Dabei wird die Leistungsskalierbarkeit erhalten und durch geeignetes Fokussieren kann immer ausreichend Nichtlinearität zur Phasenverkopplung der Lasermoden erreicht werden. Da keine Absorption auftritt, sind auch keine thermischen Probleme bei hohen Energien innerhalb des Resonators zu befürchten und aufgrund des Fehlens jeglicher leistungsbeschränkender Bauteile ist diese Anordnung zur Erzeugung von Pulsen mit prinzipiell beliebig hohen Leistungen geeignet. Vor dem Ausgangskoppler 8 ist vorzugsweise noch eine Blende 12 angebracht. Die Blende 12 kann in Form einer wirklichen Blende oder durch eine sogenannte "weiche Blende", die durch die Pumpzone im Medium definiert ist, realisiert sein. Die für halbleiterbasierte sättigbare Absorber (SESAMs) bestehende Grenze von Leistungen um etwa 10 W im Laserresonator (entsprechend 700 mW Ausgangsleistung) können mit der erfindungsgemäßen Konstruktion ohne Gefahr weit überschritten werden. Nicht dargestellt ist zumindest eine Einrichtung zur Dispersionskontrolle.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Lasersystems ist in Fig. 3 dargestellt, wobei zwei laseraktive Scheiben 1, 13 vorgesehen sind und gleichzeitig als Faltspiegel im doppelt X-förmigen Laserresonator verwendet werden. Selbstverständlich ist auch die zweite laseraktive Scheibe 13 auf einer Wärmesenke 14 montiert. Zur Erzielung ausreichender Nichtlinearität für die Kerr-Linsen-Phasenverkopplung der Lasermoden ist wieder das transparente, nichtlineare Plättchen 11 zwischen zwei konkaven Spiegeln 15 und 16 vorgesehen. Wie leicht erkennbar ist, stellt dieser modulare Aufbau des Lasersystems eine bevorzugte Möglichkeit zur Leistungsskalierung dar, indem je nach gewünschter Ausgangsleistung zusätzliche laseraktive Medien eingesetzt werden können.

Neben der beschriebenen Kerr-Linsen-Phasenverkopplung besteht auch die Möglichkeit, andere nichtlinear optische Phasenverkoppler anzuwenden, insbesondere APM-

Einrichtungen, d. h. Einrichtungen für das "additive pulse modelocking", sowie verschiedene, auf Nichtlinearität 2. Ordnung basierende, nichtlineare Spiegelanordnungen. Allen diesen Methoden ist gemeinsam, daß sie passive, nicht-linear-optische Methoden der Phasenmodulation sind und damit eine Leistungsskalierung durch Strahldurchmesseranpassung erlauben.

Als bevorzugte Lösung zur Dispersionskontrolle sind die beiden Spiegel 15 und 16 als Gires-Tournois-Interferometer-Spiegel ausgebildet, wodurch sich eine vorteilhafte prismenlose Dispersionskontrolle verwirklichen läßt. Vorteilhafterweise ist auch der Endspiegel 17 des Laserresonators als Gires-Tournois-Spiegel ausgeführt. Deren internes optisches Feld kommt nahe an jenes von hochreflektierenden Standardreflektoren heran, sie weisen niedrige Verluste von kleiner als 0,1% pro Reflektion auf und aufgrund ihrer typischen Bandbreite von 20 bis 30 nm sind derartige Gires-Tournois-Spiegel bis hinunter zu Pulsen von 40 fs einsetzbar. Gires-Tournois-Spiegel bestehen aus einem oberen Reflektor, einem Abstandhalterbereich und einem praktisch 100%igen unteren Reflektor. Die Dispersion der Gruppenlaufzeit der Anordnung von Gires-Tournois-Spiegeln ist über eine bestimmte Bandbreite starker negativ als bei anderen Spiegel-Strukturen, beispielsweise bei dispersiven Spiegeln ("chirped mirrors"), so daß weniger Reflektionen zur Dispersionskorrektur notwendig sind. Da eine geringere Eindringtiefe bei Verwendung der Gires-Tournois-Spiegel auch weniger Verlust im Material der Spiegel bedeutet, ergibt sich der zusätzliche Vorteil, daß die Verluste innerhalb des Laserresonators wesentlich verringert sind.

Da für viele Anwendungen in Wissenschaft und Technik die direkt vom Laseroszillator stammenden Pulsenergien nicht ausreichend sind, ist vorteilhafterweise eine Verstärkung der ursprünglich aufgrund hoher Repetitionsraten lediglich unter 1 µJ liegenden Laserpulse vorgesehen. Dazu ist gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung dem oben beschriebenen Laserresonator ein regenerativer Verstärker nachgeschaltet, wie er schematisch in Fig. 4 dargestellt ist.

Ein linear polarisierter Seed-Puls tritt in den Verstärker durch den Polarisator 18 ein (Strahlauweitungs optik und Pulsauswähler nicht dargestellt), welcher eine dünne Folie oder ein Hochleistungswürfel sein kann. Der Puls durchläuft dann einen 45°-Paraday-Rotator 19 und ein Lambda-halbe-Plättchen 20, welche zusammen die Polarisationssebene gegenüber dem Eingang um 90° drehen und einander in der Wirkung gegenseitig auslöschen. Über einen weiteren Polarisator 21 gelangt der Seed-Puls dann zu einer elektro-optischen Zelle 22 mit statischer Lambda-viertel-Verschiebung oder separater Lambdaviertel-Platte, beispielsweise einer Bragg- oder Pockels-Zelle, die er nach dem ersten Durchgang aufgrund Reflektion am hochreflektierenden Spiegel 23 gleich nochmals durchläuft. Das konfokale Linsenpaar 24, es kann allenfalls durch ein konfokales Spiegelpaar ersetzt sein, bringt den Strahl auf passende Größe für das laseraktive Element, vorteilhafterweise wieder als Scheibe 25 auf einer Wärmesenke 26 ausgeführt, und wirkt gleichzeitig als räumliches Filterelement zur Ausfilterung kleiner Wellenfront-Störungen. Das laseraktive Element 25 ist wieder als Kalt-Spiegel vor einem Endspiegel 27 vorgesehen. Diese Verstärkeranordnung wird solange durchlaufen, bis bei der Verstärkung eine Sättigung eintritt. Mit diesem Aufbau sind Pulsenergien im Bereich von 1 mJ zu erreichen. Wenn noch höhere Pulsenergien erzielt werden sollen, ist es notwendig, das CPA (chirped-pulse-amplification)-Konzept anzuwenden und eingangsseitig Einrichtungen zur dispersiven Streckung der Laserpulse und ausgangsseitig Einrichtungen zur Re-Komprimierung der Laserpulse vorzusehen. Selbstver-

ständig können auch mehrere Verstärkerelemente zur Erzielung höherer Leistungen vorgesehen sein.

Bei allen genannten Ausführungsformen kann die im Laserresonator notwendige Blende, insbesondere für die Kerr-Linsen-Phasenverkopplungsanordnung, in Form einer wirklichen Blende oder auch durch die Pumpzone im laseraktiven Medium selbst, d. h. eine sogenannte "weiche Blende", realisiert sein.

Das erfindungsgemäße Lasersystem mit ultrakurzen Pulsen ist für viele Anwendungen vorteilhaft einsetzbar. Die direkte Plasmabildung und der direkte Materialabtrag ohne Schmelzen des Materials ist auf vielen Gebieten der Materialbearbeitung sehr erwünscht. Dabei ist eine niedrige Repetitionsrate pro Flächenelement, abhängig vom Fokusbereich notwendig. Bei etwa 50 bis 100 µm Fokusbereich sollte die Repetitionsrate 10 kHz nicht überschreiten. Dies kann durch herkömmliche Güteschaltungen bzw. durch regenerative Verstärkung (im Bereich von ca. 50 bis 100 Durchläufen) bei gleichzeitiger Verstärkung der Einzelpulse erreicht werden. Höhere Laserrepetitionsraten im MHz-Bereich, wie etwa mittels Cavity-Dumping des Oszillators erzeugt, können durch kleinere Fokusse, gegebenenfalls zusammen mit einem räumlichen Scanning, verwendet werden, wodurch die Repetitionsrate pro Flächenelement wieder stark vermindert wird.

Beispielsweise können kleinste Mikroporen in Kunststoffolien gebohrt werden. Weiters sei beispielhaft die medizinische Verwendung angeführt, insbesondere im Dentalbereich, und hier speziell die Anwendung von Systemen mit verlangsamter Pulsfolge (von etwa 100 MHz auf ca. 10 kHz) und damit erhöhter Einzelpulsenergie von bis zu 0,5 mJ bei etwa 200 fs Pulsdauer. Ein weiteres Anwendungsbeispiel wäre das Rapid-Prototyping, bei dem derzeit das UV- oder Laserlicht zum Aushärten des den Prototyp bildenden Polymers nur dessen Oberfläche erreicht und daher lange Prozeßzeiten mit sich bringt. Ein fokussierter Hochleistungs-Laser mit Pulsen im Femtosekundenbereich dringt dagegen auch unter die Oberfläche ein und führt zu einer wesentlich verkürzten Zeit des Rapid-Prototyping.

#### Patentansprüche

1. Lasersystem zur Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse, mit einem Laserresonator, der zumindest ein aktives Festkörper-Oszillatorelement enthält, vorzugsweise eine dünne Scheibe eines laseraktiven Kristalls mit hoher Verstärkungsbandbreite, insbesondere eines "Quasi-drei-Niveau"-Systems wie Yb:YAG, und zumindest je einer Einrichtung zur Phasenverkopplung der Lasermoden und zur Dispersionskompensation, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Einrichtung zur Phasenverkopplung (1, 11, 13) als passives, nichtlineares Element ausgeführt ist, und daß eine prismenlose Einrichtung zur Dispersionskompensation (15-17) vorgesehen ist.
2. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Phasenverkopplung vorzugsweise als Kerr-Linsen-Phasenverkopplungs-Einrichtung, vorzugsweise mit weicher Blende, ausgeführt ist.
3. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Phasenverkopplung als APM-Einrichtung oder als nichtlineare Spiegelanordnung mit Nichtlinearität 2. Ordnung ausgeführt ist.
4. Lasersystem nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest ein laseraktives Element (1, 13) gleichzeitig ein nichtlineares Element der Einrichtung zur Phasenverkopplung, vorzugsweise der

Kerr-Linsen-Phasenverkopplungs-Einrichtung, ist.

5. Lasersystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß eine weitere Fokuszone des Laserlichts innerhalb des Laserresonators eingestellt und in dieser Fokuszone ein selbstfokussierendes, transparentes, optisches Material (11) angeordnet ist. 5

6. Lasersystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Einrichtung zur Dispersionskompensation ein System aus dielektrischen Dispersionskompensationsspiegeln, vorzugsweise aus Gires-Tournois-Interferometer-Spiegeln (15-17), vorgesehen ist. 10

7. Lasersystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß dem Ausgangskoppler (8) des Laserresonators ein regenerativer Verstärker (18-27) nachgeschaltet ist. 15

8. Lasersystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der regenerative Verstärker einen laseraktiven Festkörper, vorzugsweise eine dünne Scheibe (25) eines laseraktiven Kristalls mit hoher Verstärkungsbandbreite, insbesondere eines "Quasi-drei-Niveau"-Systems wie Yb:YAG, vorzugsweise als aktiven Endspiegel, aufweist. 20

9. Lasersystem nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß der regenerative Verstärker ein- gangsseitig Einrichtungen zur dispersiven Streckung der Laserpulse und ausgangsseitig Einrichtungen zur Re-Komprimierung der Laserpulse aufweist. 25

10. Lasersystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserresonator eine Cavity-Dumping-Schaltung oder eine Güteschaltung enthält. 30

11. Lasersystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß diese Schaltung als Bragg- oder Pockels-Zelle (22) oder durch einen akusto-optischen Modulator realisiert sein. 35

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

40

45

50

55

60

65

FIG. 1

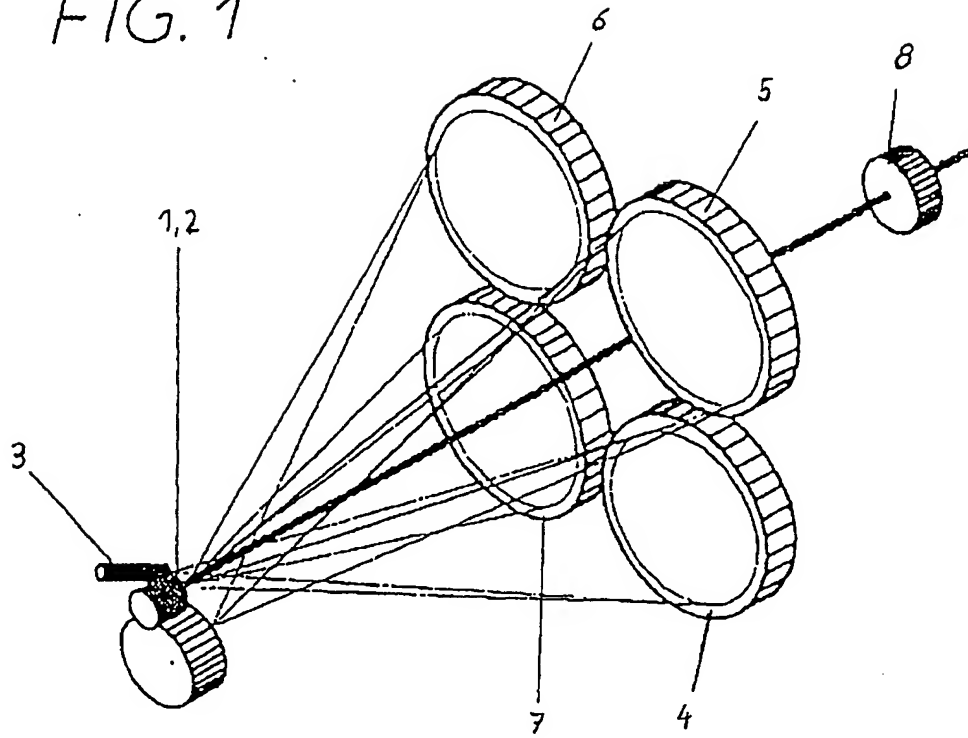
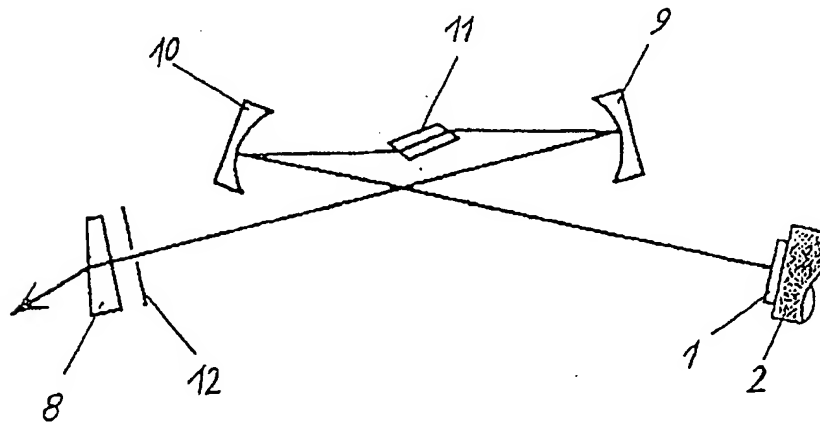
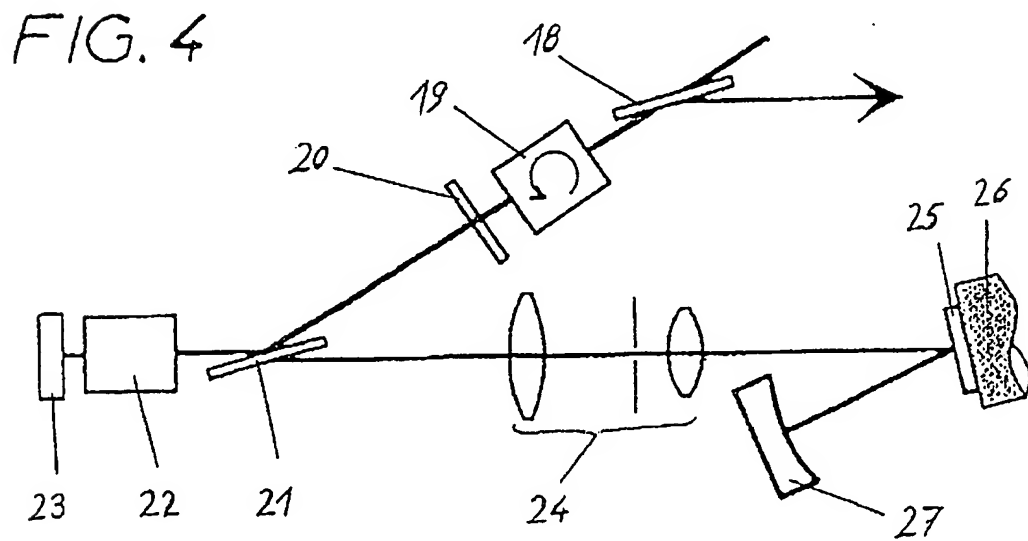
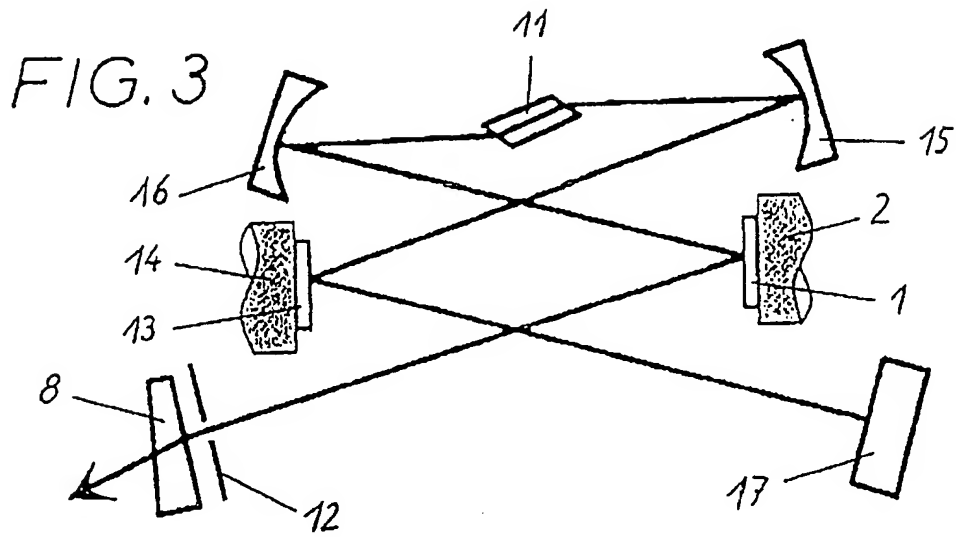


FIG. 2





**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**